

- температуру реакционного газа, °С
 $t_{pc} = 160...190$;
- остаточное содержание фторида кальция и серной кислоты в отвале, мас. доли
 $x_{CaF_2} = 0,002...0,02$; $x_{H_2SO_4} = 0,005...0,015$;
- характеристики состава входных потоков, мас. доли
 $C_{HF} = 0,068...0,089$;
 $C_{CaF_2} = 0,95...0,96$;
 $C_{H_2SO_4} = 0,89...0,92$,

возможно приготовление оптимальной по составу рабочей смеси кислот:

$$\begin{aligned} H_2SO_4 &- 89,50...91,44 \% \\ HF &- 8,32...9,56 \% \\ H_2O &- 0,24...0,50 \% \end{aligned}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев В.А., Новиков А.А., Родин В.И. Производство фтористых соединений при переработке фосфатного сырья. – М.: Химия, 1982. – 248 с.
2. Исследование кинетики термической переработки фторсернокислых растворов / Пищулин В.П., Гришин С.Н., Зарипова Л.Ф.; Томский политехнический ин-т. – Томск, 1988. – 23 с. Деп. в ОНИИТЭХИМ, г. Черкассы, 22.06.1988, № 758 хп – Д88.

При этом в производстве фтороводорода на печах с внешним электрическим обогревом степень термического разложения флюорита достигает 99,1...99,3 % при одновременном снижении содержания серной кислоты в отвальном гипсе до 4,0...9,0 % и уменьшении расходных коэффициентов по флюориту сорта ФФ95А до 2,17...2,20 т, а также серной кислоты в пересчете на моногидрат 3,0 т на 1,0 т фтороводорода [3].

Выводы

Проведены промышленные исследования процесса получения фтороводорода в барабанных вращающихся печах. Получены регрессионные уравнения, пригодные для автоматизированного управления процессом. Установлены оптимальные условия процесса получения фтороводорода, обеспечивающие степень разложения флюорита 99,1...99,3 %.

3. Kerbel V.M., Pishchulin V.P., Kladiev S.N. Digital control algorithm of the chemical engineering plant for production of anhydrous hydrogen fluoride // The 4th Intern. Conf. for conveying and handling of particulate solids. – Budapest, 2003. – P. 2.35–2.37.

УДК 661.879:621.039.54

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В.П. Пищулин, В.Н. Брендаков

Северский государственный технологический институт
 E-mail: bvn@ssti.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием математической модели процесса термического разложения полиуратов аммония. Путем сделанных допущений получена система уравнений, описывающая замкнутый цикл основных процессов, происходящих в барабанной вращающейся печи. Представлен алгоритм расчета температуры и степени термического разложения полиуратов аммония, который позволяет проводить оптимизацию параметров и режимов работы барабанной вращающейся печи на основе методов математического моделирования.

Одним из основных промышленных методов производства оксидов урана является метод химической денитрации уранилнитрата. Поэтому исследование процесса термического разложения полиуратов аммония имеет большое практическое значение. Одним из ключевых конструктивных элементов такой технологии является барабанная вращающаяся печь. Термическая диссоциация полиуратов аммония является весьма сложным процессом, и вследствие этого, несмотря на многочисленные данные о таком процессе, до сих пор не существует общепринятых закономерностей, описывающих его.

Во-первых, различные данные имеют противоречивый характер, и, во-вторых, реальный экспе-

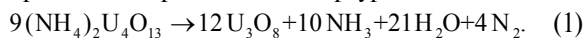
римент связан с большой стоимостью и высокой сложностью его выполнения. Исходя из этого, становится оправданным использование методов математического моделирования, достоверно описывающих реальные процессы, происходящие в барабанной вращающейся печи. Создаваемые модели могут быть использованы для проведения численных экспериментов, позволяющих решить задачи по оптимизации режимно-геометрических параметров самого устройства и выявлять факторы, оказывающие существенное влияние на процесс прокаливания полиуратов аммония.

Ввиду большой сложности описания математически точно всех процессов, протекающих в бара-

банной печи, невозможно получить полный количественный расчет. Наибольшая трудность при создании математической модели состоит в том, что бы правильно выбрать допущения, позволяющие, с одной стороны, получить замкнутую систему уравнений, описывающих работу аппарата, а с другой стороны – построенная модель должна отражать основные физико-химические процессы, протекающие в печи.

Данная статья посвящена описанию первого варианта созданной математической модели барабанной вращающейся печи. Постановка задачи заключается в том, чтобы выбрать обоснованные допущения, которые не искажают основное содержание реального процесса, и в то же время позволяют записать в виде математических соотношений ключевые физико-химические процессы, реализуемые в печи.

При построении модели за основу был выбран аппарат, работающий на Сибирском химическом комбинате. Печь представляет собой цилиндрическую ёмкость диаметром $D=0,6$ м и длиной $L=8,8$ м, расположенную под углом наклона два градуса к горизонту, и вращающуюся с постоянной скоростью 3,33 об/мин. Степень заполнения прокалочной печи исходным продуктом составляет 3,0...3,5 %. Время нахождения продукта в барабане составляет порядка 20 мин. Там при температуре 450...650 °С происходит необратимая эндотермическая реакция термического разложения тетраураната аммония:



В прокалочную печь подается предварительно нагретый азот, расход которого составляет от 6 до 20 м³/ч. При проведении процесса термического разложения в атмосфере азота возрастает содержание урана в конечном продукте по сравнению с проведением того же процесса при продувке барабанной печи воздухом. Проведение процесса в инертной среде способствует уменьшению гранул конечного продукта, снижению рабочей температуры на 50...150 °С, повышает химическую активность оксида урана, ускоряет последующую операцию фторирования, повышает степень и скорость термического разложения и снижает энергетические затраты на 20...30 % [1].

Учитывая малый размер частиц исходного продукта (порядка 150...200 мкм), а также большой свободный объем в рабочей зоне прокалочной печи, можно сделать следующие допущения:

- реакция протекает только по ур. (1);
- физико-химические свойства материала не зависят от температуры;
- подвод тепла от стенки печи к слою материала осуществляется только теплопроводностью;
- время пребывания материала в аппарате не зависит от производительности;
- температура T_w нагревателей среды по всей длине печи остается постоянной;

- температура T слоя материала не имеет поперечного градиента.

Таким образом, задача создания математической модели физико-химических процессов, протекающих в прокалочной печи при термическом разложении дисперсного порошка полиураната аммония, состоит в том, что бы описать движение однородной сыпучей среды в рабочей зоне аппарата с учетом необратимой гетерогенной эндотермической реакции и процессов теплопереноса. В первом приближении можно рассмотреть одномерное движение слоя материала с постоянной скоростью.

Для описания распределения температуры вдоль аппарата используется уравнение конвективного теплообмена с учетом дополнительных источников теплоты [2]:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_1 - q_2, \quad (2)$$

где $q_1 = C_1(T_w - T_i)$ – теплота за счет нагрева печи, $q_2 = C_2 \Delta H \Delta \alpha$ – теплота, поглощаемая за счет реакции, $\Delta \alpha = \alpha_i - \alpha_{i-1}$ – изменение степени превращения вдоль аппарата.

Для оценки степени превращения воспользуемся эмпирической зависимостью, полученной в результате экспериментальных исследований на промышленной установке в условиях реального технологического процесса:

$$\alpha_i = 1 - (1 - \alpha_{i-1}) \exp \left(-5 \cdot 10^{14} \cdot \exp \left(-\frac{26700}{T_{i-1}} \right) \right), \quad (3)$$

где c_p – теплоемкость материала, 290 Дж/кг·К; ρ – насыпная плотность материала, 1850 кг/м³; u – скорость движения материала, 0,44 м/с; λ – теплопроводность слоя материала, 30 Дж/м·К·мин; C_1 – константа модели, 0,105; T_w – температура поверхности прокалочной печи, 1020 К; C_2 – константа модели, 0,0175; ΔH – энтальпия реакции (1), $5,9 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Граничные условия на входе в печь для температуры полиураната аммония выбирались 600 К, степень превращения – равна нулю, на выходе – равенство нулю производной от температуры по координате.

Таким образом, ур. (2, 3) совместно с граничными и начальными условиями представляют собой математическую модель процесса термического разложения в виде замкнутой системы, достаточной для определения характера изменения температуры и степени превращения вдоль прокалочной печи.

Созданная математическая модель решалась численно с использованием метода конечных разностей. Разностный аналог дифференциального уравнения записывался в виде чисто неявной схемы, т.к. она является, безусловно, устойчивой. Совместное решение этой системы находилось методом установления по времени с использованием алгоритма прогонки. На каждом шаге итерационного процесса вычислялось распределение температуры, и затем на основании ее находилась степень превращения.

Для оценки степени достоверности созданной модели реальному процессу, происходящему в барабанной вращающейся печи, был проведен тестовый расчет по экспериментальным данным из работ Сибирского химического комбината и Северского государственного технологического института. Результаты сравнения расчета, сплошная линия, и экспериментальных данных показаны на рис. 1, 2.

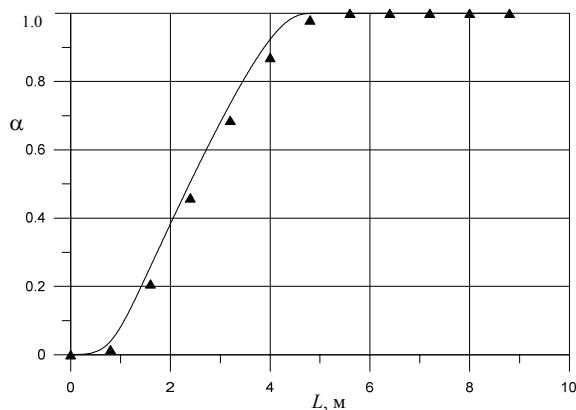


Рис. 1. Распределение степени термического разложения полиуратов аммония вдоль прокаточной печи

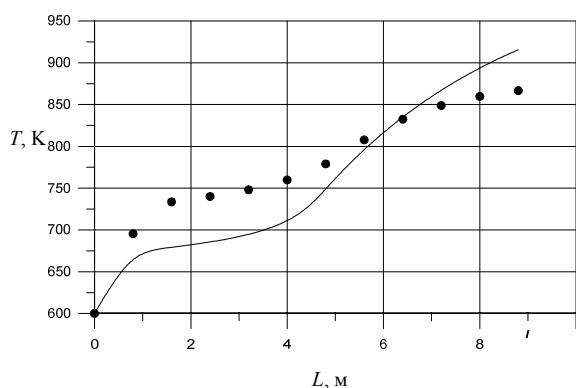


Рис. 2. Распределение температуры слоя продукта вдоль прокаточной печи

Хорошее совпадение позволяет сделать вывод о возможности использования данной математической модели для проведения расчетов по оптимизации параметров и режимов работы барабанной вращающейся печи. На рис. 3, 4 представлены результаты численного моделирования работы прокаточной печи при различных режимах прогрева вдоль аппарата. Во всех случаях температура печи на входе исходного полиурата аммония принималась 1200 К. Первая кривая соответствует режиму нагрева, когда температура обогрева линейно падает до значения на выходе конечного продукта 1000 К. Вторая кривая отвечает режиму с постоянной температурой обогрева печи 1200 К. И, наконец, третья кривая получена при режиме прогрева с линейным увеличением температуры вдоль печи до значения на выходе конечного продукта 1400 К. Как видно из рисунков, не смотря на явное различие в распределении температуры слоя продукта вдоль печи, степень превращения практически не

изменилась. Это связано с тем, что основной процесс термического разложения полиурата аммония происходит в первой трети печи, когда четко заметна полочка на профиле температуры слоя материала. Отсюда следует, что увеличение температуры ведет только к неоправданным затратам электрической энергии на обогрев печи.

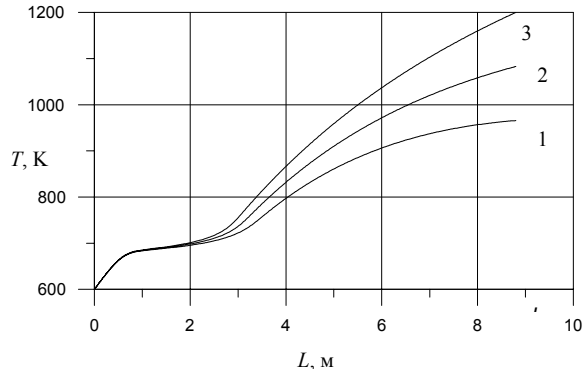


Рис. 3. Распределение температуры слоя продукта при разных режимах прогрева печи

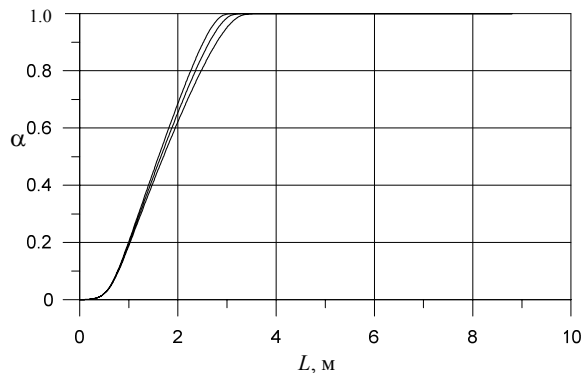


Рис. 4. Распределение степени превращения при разных режимах прогрева печи

На рис. 5 показана зависимость точки в аппарате, где степень термического разложения полиурата аммония становится равной единице, в зависимости от температуры стенки печи.

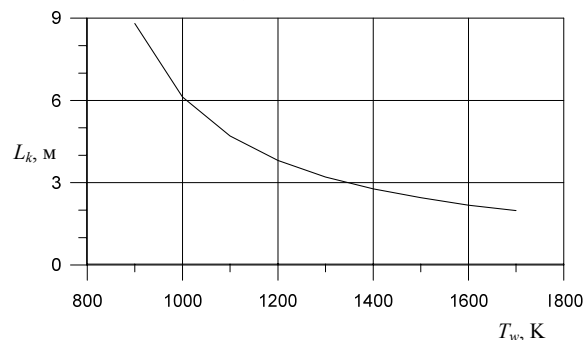


Рис. 5. Зависимость точки окончания процесса термического разложения от температуры стенки печи

На рис. 6 представлено распределение температуры слоя продукта вдоль аппарата для разных интенсивностей движения сыпучей среды. Базовому значению массового расхода исходного продукта соответствует кривая 2. Кривая 1 получена в ре-

зультате уменьшения расхода в два раза. Кривые 3–5 показывают изменение температуры в случае увеличения массового расхода в 2, 3 и 4 раза соответственно. На рис. 7 изображено изменение степени термического разложения вдоль аппарата при аналогичных режимах работы печи. Увеличение массового расхода приводит к изменению степени прогрева материала, особенно во второй половине печи. Причем явно заметна нелинейность между производительностью и степенью термического разложения. Расчеты показывают, что увеличение производительности прокалочной печи в 2, 3 и даже в 4 раза, при данной длине аппарата, обеспечивает полноту термического разложения полиурната аммония. Изменение температурного режима печи не приводит к столь существенному увеличению интенсификации процесса прокаливания.

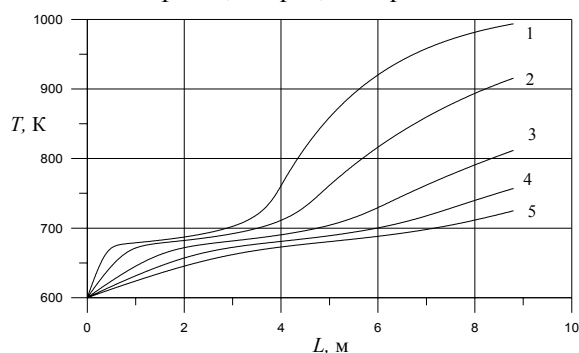


Рис. 6. Распределение температуры слоя при разном массовом расходе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhiganov A., Lobas O., Pishchulin V., Mironov V. Thermal decomposition of $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ // Vth Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology Proceeding (KORUS 2001). June 26–July 3.

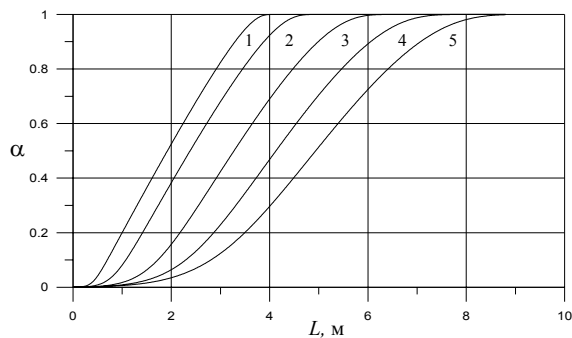


Рис. 7. Распределение степени термического разложения полиурната аммония при разном массовом расходе исходного вещества

Выводы

1. Проведено исследование процесса термического разложения полиурната аммония в промышленных условиях.
2. На основании лабораторных и промышленных исследований построена математическая модель термического разложения полиурната аммония.
3. Проведен численный анализ адекватности модели экспериментальным данным и получено хорошее согласование.
4. Созданная модель показала возможность повышения производительности барабанной вращающейся печи без снижения качества конечного продукта.

2001. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2001. – V. 2. – P. 165–167.

2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопердача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

УДК 536.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ

А.В. Шваб, *В.Н. Брендаков

Томский государственный университет

*Северский государственный технологический институт

E-mail: bvn@ssti.ru

Представлены результаты численных расчетов турбулентного закрученного осесимметричного течения. Расчет турбулентных характеристик проведен на основе дифференциальной модели турбулентности. Приведены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными. Показаны результаты численного исследования о влиянии геометрии рабочей зоны пневматического классификатора на характер течения.

Центробежные аппараты широко используют во многих отраслях народного хозяйства. Вопросы проектирования новых моделей и совершенствование существующих конструкций тесно связаны с анализом процессов, происходящих в этих аппаратах. Гидроди-

намическая картина течения, реализуемая в таких устройствах, оказывает существенное влияние на весь технологический процесс. Очень часто в пневматических аппаратах в качестве рабочей среды используют воздух, а сами конструкции имеют сложную геоме-